



EVALUATION DE LA PERFORMANCE D'UN STOCKAGE PAR CLASSES DANS LE CONTEXTE DU STOCKAGE EN AS/RS A CONVOYEURS GRAVITATIONNELS

Nihad Meghelli, Zaki Sari, Olivier Cardin, Pierre Castagna

► To cite this version:

Nihad Meghelli, Zaki Sari, Olivier Cardin, Pierre Castagna. EVALUATION DE LA PERFORMANCE D'UN STOCKAGE PAR CLASSES DANS LE CONTEXTE DU STOCKAGE EN AS/RS A CONVOYEURS GRAVITATIONNELS. 9e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'10), 2010, Hammamet, Tunisie. pp.167. hal-00620879

HAL Id: hal-00620879

<https://hal.science/hal-00620879>

Submitted on 9 Sep 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

EVALUATION DE LA PERFORMANCE D'UN STOCKAGE PAR CLASSES DANS LE CONTEXTE DU STOCKAGE EN AS/RS A CONVOYEURS GRAVITATIONNELS

Nihad MEGHELLI-GAOUAR, Zaki SARI

Laboratoire d'Automatique de Tlemcen, Faculté des
Sciences de l'Ingénieur,
Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen
Chetouane B.P 230, 13000 Tlemcen - Algérie
n_gaouar@mail.univ-tlemcen.dz,
z_sari@mail.univ-tlemcen.dz

Olivier CARDIN, Pierre CASTAGNA

IRCCyN, IUT de Nantes
2 Avenue du Pr J. Rouxel
44470 Carquefou - France
olivier.cardin@irccyn.ec-nantes.fr,
pierre.castagna@univ-nantes.fr

RÉSUMÉ : *L'axe de recherche que nous proposons dans cet article concerne l'utilisation du stockage par classes dans un AS/RS à convoyeurs gravitationnels. En supposant que les références dans ce type de magasin n'ont pas toutes le même taux de rotation, nous proposons de définir à la fois des classes de produits triés selon leur demande, et une subdivision du magasin, chaque casier étant affecté au stockage d'une classe. Ainsi, si à la fois les classes de références sont bien définies, et leur implantation géographique dans le magasin est pertinente, nous montrons que le temps moyen de déstockage diminue. Après avoir dressé un état de l'art sur le stockage par classes, cet article présente les résultats d'une étude comparative réalisée par simulation entre un stockage par classes, un stockage purement aléatoire et un stockage par une heuristique développée dans une étude précédente.*

MOTS-CLÉS : *AS/RS à convoyeurs gravitationnels, heuristique de stockage/déstockage, stockage par classes, simulation à événements discrets, évaluation des performances.*

1 INTRODUCTION

Les systèmes automatisés de stockage/déstockage (*Automated Storage/Retrieval System*, AS/RS) ont été adoptés il y a un certain nombre d'années non seulement comme solution alternative aux systèmes conventionnels de stockage, mais également comme une partie intégrante des systèmes de production. Ils permettent d'améliorer la productivité dans des organismes de fabrication et de distribution, de diminuer le coût de stockage, d'améliorer le cheminement des articles et la gestion des ressources. Ils ont une grande flexibilité d'interface avec d'autres composantes de FMS (systèmes de transport, de contrôle,...) et peuvent gérer des articles de tout genre (outils, matériaux, palettes, produits, support...) avec des temps de réponse rapide pour entretenir les demandes de fabrication, d'entreposage, et des applications de distribution. De plus, ils ont une utilisation minimale d'espace (Allen, 1992), (Material Handling Institute, 1977).

Entre 1994 et 2004, il y a eu une augmentation significative du nombre d'AS/RS utilisés dans l'environnement industriel aux Etats-Unis (Roodbergen et Vis, 2009). Pendant les dernières décennies plusieurs types d'AS/RS ont été développés pour traiter le nombre croissant de références différentes de produits à stocker. Différents types d'AS/RS existent, et se différencient par leur poids, leur taille et le volume de charges stockable : l'AS/RS à charge unitaire, à mini charge, à étagère profonde, à rack

glissant, à multi-allées et à convoyeurs gravitationnels en sont des exemples (Bozer et White, 1984), (Sari *et al.*, 2005).

Les nouvelles organisations d'atelier, telle que la gestion de production en Juste à Temps par exemple, font que le temps de réponse du magasin, c'est-à-dire la durée s'écoulant entre la demande de déstockage d'un article et son déstockage effectif, devient prépondérant. De ce fait, il est important de choisir au mieux la stratégie de stockage des références dans le magasin afin de diminuer le temps moyen de déstockage des articles.

Dans le cas de l'AS/RS à convoyeurs gravitationnel, le temps de déstockage moyen pour un stockage aléatoire, c'est-à-dire sans règle étudiée de stockage des références, est assez peu performant (Sari, 2003), (Sari *et al.*, 2005).

Gaouar *et al.* (Gaouar *et al.*, 2005), (Gaouar *et al.*, 2006) ont développé une heuristique de stockage/déstockage pour réduire ce temps moyen de déstockage. L'heuristique a été développée de manière à stocker les produits de mêmes références dans le même casier au plus près de la station de livraison. Cette heuristique a permis une grande amélioration du temps moyen de déstockage. Ainsi, si l'on considère par exemple un système ayant 1000 emplacements (10x10x10) et utilisant le stockage aléatoire et ce même système utilisant l'heuristique de stockage/déstockage pour 200 références différentes, le gain de temps de déstockage est en

moyenne de 40% (Gaouar *et al.*, 2005), (Gaouar *et al.*, 2006).

L'axe de recherche que nous proposons dans cet article concerne l'utilisation du stockage par classes dans un AS/RS à convoyeurs gravitationnels dont le rack est profond. Sachant que les références dans ce type de magasin n'ont pas toutes le même taux de rotation, il semble possible de définir à la fois des classes de produits triés selon leur demande, et une subdivision du magasin, chaque casier étant affecté au stockage d'une classe. Ainsi, si à la fois les classes de références sont bien définies, et leur implantation géographique dans le magasin est pertinente, il semble raisonnable de penser que le temps moyen de déstockage devrait diminuer.

Après un état de l'art sur les différentes approches de stockage dans un magasin type AS/RS, et notamment les premiers travaux sur le stockage par classes dans les magasins en général, nous poserons le problème de l'évaluation du temps moyen de déstockage dans un AS/RS. Nous définirons ensuite le mode opératoire proposé pour l'utilisation opérationnelle du stockage par classes. Nous terminerons par la présentation des protocoles et résultats de l'étude par simulation, permettant de comparer 3 modes de stockages différents.

2 ETAT DE L'ART

2.1 Position du point de repos des machines S/R

Afin de minimiser le temps de cycle des machines de stockage/déstockage (dites machines S/R), plusieurs recherches ont étudié le problème de la position du point de repos de la machine S/R et son impact sur le temps de cycle. Bozer et White (Bozer et White, 1984) ont ainsi suggéré plusieurs règles statiques de positionnement du point de repos. Egbelu (Egbelu, 1991) a développé des formulations pour minimiser le temps de cycle et les temps de réponse maximum. Egbelu et Wu (Egbelu et Wu, 1993) ont utilisé la simulation pour comparer les règles de positionnement du point de repos. Hwang et Lim (Hwang et Lim, 1993) utilisèrent les règles développées par Egbelu (Egbelu, 1991) et les transformèrent en un problème de positionnement unique en utilisant les distances de Tchebyshev pour la première règle et le minimax de Tchebyshev pour la seconde. Peters *et al.* (Peters *et al.*, 1996) ont développé une expression analytique de la position du point de repos sous une variété de configurations d'AS/RS concluant que le meilleur point de repos de la machine de déstockage se trouve au milieu du rack et celui de la machine de stockage est au point de dépôt/livraison. Chang et Egbelu (Chang et Egbelu, 1997) ont développé deux algorithmes pour la détermination du point de repos optimal d'une machine S/R desservant un AS/RS multi allées.

2.2 Performances des méthodes de stockage et déstockage

À la suite de ces résultats, d'autres recherches ont considéré que le problème vient de l'attribution d'emplacement de stockage et le choix d'ordre de stockage et de déstockage. Lee (Lee, 1992) considéra le problème d'attribution d'espace de stockage dédié de sorte que le temps total de cycle est minimisé dans un AS/RS à personne embarquée. Il a développé une heuristique pour la disposition des espaces de stockage, basée sur la technologie de groupe. Lee et Schaefer (Lee et Schaefer, 1996) ont considéré le problème d'ordonnancement des demandes de déstockage dans un AS/RS à charge unitaire. Ils ont développé un algorithme permettant de séquencer les demandes en double cycle afin de minimiser les temps de transport.

De Koster *et al.* (De Koster *et al.*, 2008) considèrent une nouvelle configuration optimale pour un AS/RS 3-D, leurs objectif est d'analyser les performances et la dimension optimale du système afin d'améliorer le temps de cycle pour un stockage aléatoire.

2.3 Le stockage par classes

Hausman *et al.* (Hausman *et al.*, 1976) sont parmi les premiers à avoir considéré le problème du stockage par classes dans un AS/RS à simple cycle, en utilisant la courbe ABC. Graves *et al.* (Graves *et al.*, 1977) démontrent, en utilisant la simulation, que la forme en L des différentes régions, pour un stockage par classes, n'est pas nécessairement optimale pour un rack carré. Jarvis et McDowell (Jarvis et McDowell, 1991), Tang et Chew (Tang et Chew, 1997) et Chew et Tang (Chew et Tang, 1999) ont estimé le cycle moyen dans un entrepôt utilisant un stockage par classes. Van den Berg (Van den Berg, 1996) propose un algorithme d'un programme dynamique qui assigne à chaque référence de produits sa classe. Caron *et al.* (Caron *et al.*, 1998), (Caron *et al.*, 2000) proposent un modèle de temps de cycle pour un entrepôt à 2-block avec un stockage COI-par classes (cube-order-index, COI). Ashayeri *et al.* (Ashayeri *et al.*, 2002) ont utilisé une approche géométrique pour calculer le temps de cycle pour un stockage aléatoire. Park *et al.* (Park *et al.*, 2003), (Park *et al.*, 2006) ont étudié et analysé les performances d'un AS/RS à mini-charge à 2-classes. Le-Duc et De Koster (Le-Duc et De Koster, 2004), (Le-Duc et De Koster, 2005), (Le-Duc et De Koster, 2007), ainsi que Roodbergen (Roodbergen, 2001) ont estimé le temps de cycle d'un déstockage par lots, c'est-à-dire regroupant plusieurs demandes de déstockage en une livraison afin de réduire le temps de réponse moyen.

L'ensemble de ces études montrent l'importance de l'étude des performances des méthodes de stockage dans les magasins, avec plus particulièrement un critère de performance relatif au temps moyen de déstockage.

Plusieurs travaux ont également démontré que le stockage par classes permet une réduction considérable en temps de déstockage par rapport aux autres méthodes de stockage telles que le stockage dédié et le stockage aléatoire. Dans la plupart de ces recherches, l'AS/RS utilisé est toutefois à charge unitaire. Or, nous allons voir dans les exemples suivants que la profondeur du rack modifie la pertinence des résultats proposés.

Ainsi, Guenov et Raeside (Guenov et Raeside, 1992) comparent trois configurations de la forme des zones dans un AS/RS. Ils concluent que la configuration des zones pour le stockage par classes dépend de la position du point d'entrée/sortie du rack pour un AS/RS à charge unitaire.

(Rosenblatt et Eynan, 1989) et (Eynan et Rosenblatt, 1994) ont eux cherché à déterminer le nombre de classes optimal pour un AS/RS en utilisant la méthode de Hausman *et al.* (Hausman *et al.*, 1976) et concluent qu'il est préférable d'utiliser des racks avec un facteur de forme $b \geq 0.6$ et moins de 7 classes. Ashayeri *et al.* (Ashayeri *et al.*, 2002) ont développé une approche heuristique pour déterminer l'emplacement des zones de stockage pour le stockage par classes dans un AS/RS. L'algorithme détermine la taille et le nombre de zones, ainsi que leur disposition relative dans le rack de l'AS/RS.

Ha et Hwang (Ha et Hwang, 1994) ont montré que le stockage par classes à 2 classes réduit le temps de stockage et le temps de déstockage par rapport à un stockage aléatoire pour une simple et double commande pour système de stockage à carrousel.

Eldemi *et al.* (Eldemi *et al.*, 2004) ont proposé un nouveau modèle analytique pour les AS/RS afin de déterminer le temps de cycle et l'espace requis pour le stockage utilisant les différentes méthodes de stockage : dédié, aléatoire et par classes. A partir de ce modèle, ils ont déduit que l'utilisation du stockage par classes nécessite moins d'espace de stockage que l'utilisation du stockage aléatoire ou du stockage dédié, et que de plus, les temps de stockage et de déstockage sont inférieurs.

Muppani et Adil (Muppani et Adil, 2008) ont développé un modèle non-linéaire de programmation en nombre entier et un algorithme de type Branch & Bound pour comparer le stockage par classes au stockage dédié, en considérant l'espace de stockage et son coût, le coût de manutention et de préparation de commande pour un stockage par classes. L'approche présentée a permis de démontrer qu'il existe des économies importantes en utilisant le stockage par classes, bien que le stockage dédié et le stockage aléatoire soient couramment utilisés dans la planification de stockage en entrepôt.

Les résultats de ces travaux ne sont plus valables dans le cas d'un AS/RS à convoyeurs gravitationnels, où chaque casier est profond de m couches. En effet, le nombre de

produits différents stockés dans le même casier peut ralentir le déstockage du produit requis par une multiplication des restockages. De ce fait, il semble pertinent de prendre en compte non seulement la position de la station de livraison, mais également la position du couloir de retour dans la disposition géographique des classes.

2.4 Disposition géographique des couloirs dédiés aux classes dans le rack

Tout comme (Eynan et Rosenblatt, 1994), nous avons choisi la méthode de (Hausman *et al.*, 1976) pour déterminer le nombre de casiers à dédier par classes. Cette méthode a été développée pour un rack à charge unitaire, ce qui explique la position des classes (Figures 1 et 2), dessinant des arcs de cercles autour de la station de livraison (Guenov et Raeside, 1992). De ce fait, parlant d'un rack profond, nous allons adapter la disposition des classes pour prendre en compte la position du couloir de restockage.

Selon la politique du stockage par classes, les produits dans l'entrepôt sont divisés en groupes basés sur leur fréquence d'entrée/sortie. Ces groupes de produits sont assignés à une région (classe) où le nombre de régions est égal au nombre de groupes. L'attribution des groupes d'articles aux régions est faite selon la fréquence d'entrée/sortie. Ainsi, la région dont découle le plus faible temps moyen de déstockage (restockages compris) est assignée au groupe d'articles avec la fréquence la plus élevée. Ce processus continue jusqu'à ce que la région donnant le plus fort temps moyen de déstockage soit assignée au groupe d'articles avec la plus basse fréquence.

L'analyse ABC permet de ranger tous les produits dans un inventaire par leur contribution à la demande totale et les classer en groupe (classe), la classe A représentant les produits à fort débit, la classe B les produits de moyen débit, et la classe C les articles à faible débit. La courbe ABC représente le pourcentage cumulé de la demande, $G(i)$, par rapport au pourcentage de produits de l'inventaire, i .

Hausman *et al.*, (Hausman *et al.*, 1976) représentent la courbe ABC par la fonction :

$$G(i) = i^s \quad \text{avec } 0 < s \leq 1 \quad (3)$$

Chaque région i (classe i) dans un AS/RS est caractérisée par le pourcentage cumulé de la demande par rapport à l'inventaire des produits, G_i . Et la distance entre la station de livraison et la région i , R_i . la relation entre G_i et R_i est définie comme suit (Hausman *et al.*, 1976), (Rosenblatt et Eynan, 1989) et (Eyan et Rosenblatt, 1994) :

$$G_i = R_i^{\frac{4s}{s+1}} \quad (4)$$

Le tableau 1 représente pour chaque courbe ABC, la valeur du coefficient s et de R_i , R pour 2 classes (figure

1) et R_1 et R_2 pour 3 classes (figure 2) en fonction du taux de rotation de la classe A. Ainsi, la répartition dénommée « 20%/60% » indique que 20% des références présentes dans le rack représentent 60% du trafic en entrée et en sortie.

| Courbe ABC | S | 2 classes | 3 classes | |
|---------------|-------|-----------|-----------|-------|
| | | R | R1 | R2 |
| 20%/60% | 0.318 | 0.408 | 0.10 | 0.575 |
| 20%/80% | 0.139 | 0.285 | 0.075 | 0.45 |
| 20%/90% | 0.065 | 0.181 | 0.05 | 0.40 |

Tableau 1 : Coefficients de (Hausman et al., 1976)

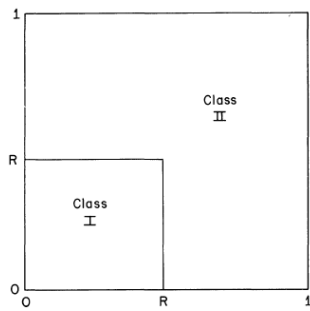


Figure 1. Rack à 2 classes.

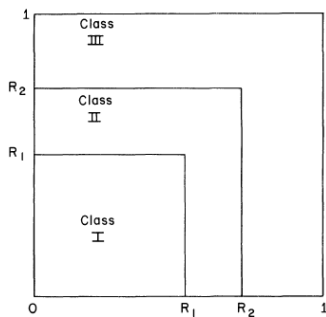


Figure 2. Rack à 3 classes.

La prochaine section présente la modélisation de l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels utilisé dans cette étude.

3 L'AS/RS A CONVOYEURS GRAVITATIONNELS

3.1 Notations

- $\overline{E(RC)}$ temps moyen de déstockage ;
 $\overline{E(V)}$ temps moyen de transport entre deux points de la face du rack ;
 L, H, D longueur, hauteur et profondeur du rack de l'AS/RS à Convoyeurs Gravitationnels ;
 l, h, d longueur, hauteur et profondeur d'un emplacement de stockage ;
 M nombre d'emplacements dans un casier, nombre de couches dans un rack ;
 m numéro de couche ;
 N nombre de casiers dans le rack complet ;
 N_l nombre de casiers pour chaque ligne ;
 N_h nombre de casiers pour chaque colonne ;
 t_h temps de déplacement horizontal de la station de dépôt/livraison à la colonne la plus éloignée ;
 t'_h temps de déplacement horizontal entre deux casiers mitoyen ;
 t_v temps de déplacement vertical de la station de dépôt/livraison à la ligne la plus éloignée ;
 t'_v temps de déplacement vertical entre deux casiers mitoyen ;
 V_h, V_v vitesses horizontale et verticale pour la machine de stockage et la machine de déstockage ;
 b facteur de forme ;
 T facteur de normalisation ;
 ρ taux de charge.

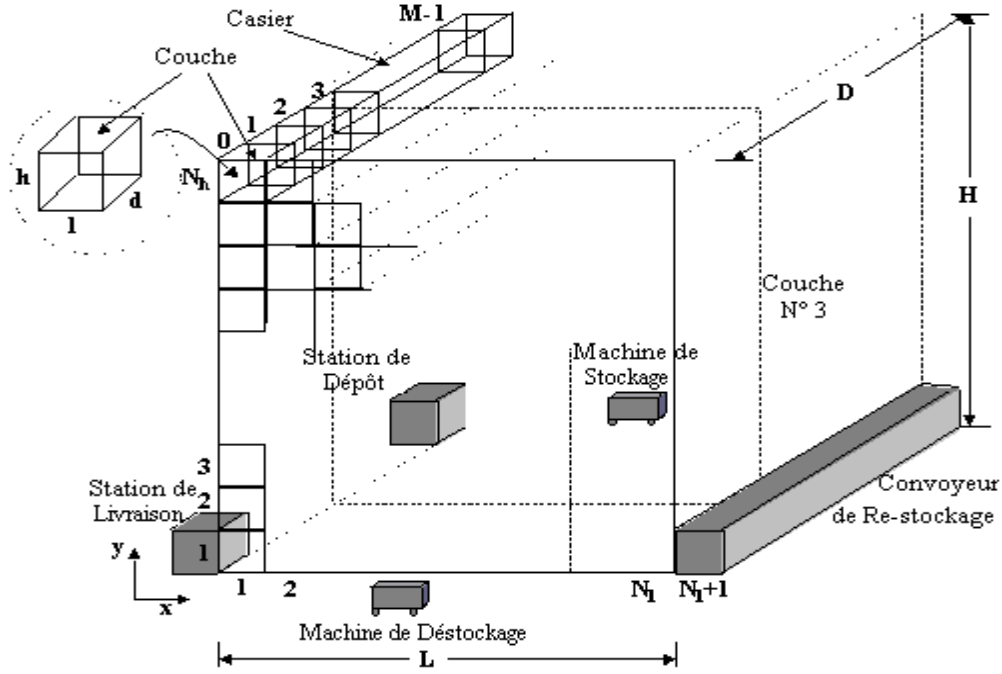


Figure 3. Configuration de l'AS/RS à Convoyeurs Gravitationnels

3.2 Présentation du système

L'AS/RS à convoyeurs gravitationnels est un rack profond constitué d'un ensemble de casiers dont les supports sont des convoyeurs gravitationnels. Deux machines S/R se trouvent aux deux extrémités, l'une sur une face assurant le stockage et l'autre sur la face opposée assurant le déstockage. Les deux machines sont reliées entre elles par un convoyeur de restockage incliné en sens inverse permettant à la machine de stockage d'accéder aux produits pour les re-stocker.

Dans notre étude, la station de dépôt est située au coin bas de la face de stockage et la station de livraison au coin bas de l'autre face. Les points de repos optimaux, tels que déterminés par Peters *et al.* (Peters *et al.*, 1996), sont la station de dépôt pour la machine de stockage et le milieu du rack pour la machine de déstockage.

Comme le montre la figure 3, le rack a une hauteur H , une largeur L et une profondeur D . Il est composé de casiers dont le support est un convoyeur gravitationnel, CG. Chaque casier comporte M emplacements disposés en matrice multicouche composée de N_l casiers horizontaux, N_h casiers verticaux et M couches numérotées de 0 (face de déstockage) à $M-1$ (face de stockage).

La machine de stockage et la machine de déstockage peuvent se déplacer simultanément sur deux axes (*Tchebyshev Travel*). Ces deux axes forment le plan (x,y) parallèle aux deux faces du rack. Les machines de stockage/déstockage possèdent la même vitesse horizontale V_h et la même vitesse verticale V_v . Par conséquent, les temps de déplacement peuvent être calculés comme suit :

- $t_h = L/v_h$ et $t_v = H/v_v$

- $t'_h = l/v_h = t_h/N_l$ avec $l = L/N_l$
- $t'_v = h/v_v = t_v/N_h$ avec $h = H/N_h$

4 MODÉLISATION DU TEMPS MOYEN DE DÉSTOCKAGE

4.1 Stockage aléatoire

(Sari, 2003) et (Sari *et al.*, 2005) ont considéré que la face de stockage ou de déstockage du rack à convoyeurs gravitationnels est similaire à celle d'un rack à charge unitaire. Le comportement de la machine de stockage dans le système AS/RS à convoyeurs gravitationnels est le même que dans le système à charge unitaire, donc le temps moyen de stockage reste inchangé. Cependant, l'opération de déstockage pour un AS/RS à convoyeurs gravitationnels se compose de plusieurs séquences, afin d'arriver à l'article désiré. En effet, la machine de déstockage doit en premier lieu déstocker tous les produits qui le précèdent et les renvoyer vers la machine de stockage à travers le convoyeur de restockage. Le temps moyen de déstockage pour un produit se trouvant dans une couche m peut alors être déterminé comme suit :

$$\overline{E(RC)}_m = \overline{E(V_1)} + \overline{E(V_2)} + m(\overline{E(V_3)} + \overline{E(V_4)}) \quad (1)$$

où

- m : le numéro de la couche où se trouve le produit désiré (avec $0 \leq m \leq M-1$)
- $\overline{E(V_1)}$: le temps moyen de transport entre le point de repos de la machine S/R et le point de déstockage;
- $\overline{E(V_2)}$: le temps moyen de transport entre le point de déstockage et la station de livraison;

- $\overline{E(V_3)}$: le temps moyen de transport entre le point de déstockage et le convoyeur de restockage;
- $\overline{E(V_4)}$: le temps moyen de transport entre le convoyeur de restockage et le point de déstockage.

En se basant sur les travaux de Bozer et White (Bozer et White, 1984) concernant le temps de cycle des AS/RS à charge unitaire, et les travaux de Peters et al. (Peters et al., 1996) concernant la position du point de repos des machines de stockage/déstockage, Sari et al. (Sari et al., 2005) (Sari et al., 2007) ont développé l'expression du temps moyen de déstockage pour l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels pour un stockage/déstockage purement aléatoire :

$$\overline{E(RC)} = T \left(\frac{b^2}{3} + 1 \right) \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{2} \rho.M \right) \quad (2)$$

avec $T = \max(t_h, t_v)$;

$$b = \min(t_h/T, t_v/T)$$

4.2 Heuristique de stockage/déstockage

L'heuristique de stockage/déstockage à été développée sur un ensemble de règles simples, ayant pour objectif commun de réduire le temps de déstockage. Elle est constituée de deux procédures, appelées procédure de stockage et procédure de déstockage (Gaouar et al., 2005, 2006). Le développement de cette heuristique est basé sur les idées suivantes:

- **Procédure de stockage** : la procédure de stockage comporte trois priorités hiérarchiques, et consiste à :
 1. Placer les produits à stocker derrière des produits de même référence, les casiers ex-æquo étant classés dans l'ordre croissant de leur proximité avec la station de livraison et/ou le point de repos de la machine de déstockage. Cette règle sera appelée « 1^{ère} priorité » dans le reste du document.
 2. Stocker dans des casiers vides les plus proches de la station de livraison et/ou du point de repos de la machine de déstockage, si la 1^{ère} priorité n'est pas réalisable. C'est la 2^{ème} priorité
 3. Si la 2^{ème} priorité n'est pas réalisable, stocker dans des casiers ayant le moins de produits en nombre, les casiers ex-æquo étant classés dans l'ordre croissant de la variété de produits contenus. C'est la 3^{ème} priorité
- **Procédure de déstockage** : La procédure de déstockage consiste à chercher le produit désiré se trouvant dans la couche la plus proche de l'allée où se trouve la machine de déstockage. Les casiers ex-æquo sont départagés par leur

proximité avec la station de livraison et/ou le point de repos de la machine de déstockage

L'analyse des résultats des travaux précédents (Gaouar et al., 2005) (Gaouar et al., 2006) ont permis de montrer l'intérêt d'utiliser cette heuristique pour le contrôle de l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels, le temps moyen de déstockage pour un système utilisant l'heuristique est inférieur au temps moyen obtenu pour un stockage aléatoire.

Toutefois, cette amélioration tend à diminuer au fur et à mesure de l'augmentation du rapport entre le nombre de références présentes dans le magasin et le nombre d'emplacements de stockage de ce même magasin.

5 VALIDATION EXPÉRIMENTALE

L'objet de cette partie est d'évaluer le temps moyen de déstockage du système en fonction de la politique de stockage considérée. Pour cela, nous allons étudier, par simulation à événements discrets (logiciel Arena), le comportement des différentes règles de stockage vis-à-vis d'une demande stochastique. Deux modèles de simulations sont étudiés, et comparés au modèle analytique de (Sari et al., 2005) pour un stockage aléatoire sur la totalité du rack.

Ainsi, nous avons considéré un système AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers à 10 couches. Le taux de remplissage du rack, ρ est égal à 75% et le facteur de forme b est égale à 1.

5.1 Modèle M1 : Stockage aléatoire total

Ce modèle analytique (voir section 4.1.) est notre référence. Le résultat obtenu dépend principalement de la forme du rack, et du taux de remplissage moyen de celui-ci.

5.2 Modèle M2 : Stockage par heuristique (Gaouar et al., 2005) (Gaouar et al., 2006)

Nous utilisons dans ce premier modèle de simulation l'heuristique de stockage/déstockage présentée en section 4.2.

Les résultats obtenus dépendant notamment du nombre de références différentes présentes dans le rack, nous faisons varier ce nombre entre 100 et 5000 pour étudier la performance de la solution.

5.3 Modèle M3 : Stockage par classes, stockage aléatoire à l'intérieur de chacune des deux classes

Pour ce dernier modèle, c'est le stockage par classes qui va être utilisé comme méthode de stockage. En se basant sur les travaux de (Hausman et al., 1976), nous allons répartir le système en 2 classes à partir des coefficients

présentés dans le Tableau 1. Outre le nombre de références différentes présentes dans le rack, nous faisons varier le taux de rotation des produits de la classe A : 20%/60%, 20%/80% et 20%/90%. Enfin, la zone dédiée à la classe A est fixée sur les couloirs reliant la station de livraison au couloir de retour, c'est-à-dire aux lignes du bas du rack dans notre application.

6 RESULTATS

6.1 Influence du taux de rotation sur M2

Comme expliqué précédemment, les résultats de M3 sont influencés par le taux de rotation des produits de la classe A. Les premiers résultats que nous proposons dans le Tableau 2 concernent alors l'influence de ce taux de rotation sur les résultats de l'heuristique M2, étant bien entendu que les résultats de M1 ne sont pas du tout influencés par ce facteur. Ces résultats, pour toute la gamme de variété de références étudiées, montrent une très faible importance de ce facteur.

| | | Nombre de références | | | |
|------------------|---------|----------------------|-------|--------|--------|
| | | 100 | 500 | 1000 | 5000 |
| Taux de rotation | 20%/60% | 33.97 | 58.69 | 121.09 | 238.31 |
| | 20%/80% | 33.53 | 60.19 | 121.43 | 237.60 |
| | 20%/90% | 33.35 | 61.99 | 121.53 | 238.41 |

Tableau 2 : Influence du taux de rotation sur les résultats de l'heuristique (Modèle M2)

De ce fait, nous avons choisi de poursuivre notre étude sur un seul taux (20%/80%).

6.2 Influence du nombre de références sur M3

À l'inverse, le modèle M2 est fortement influencé par le nombre de références différentes présentes dans le rack. Or, le stockage étant aléatoire dans chacune des classes définies dans M3, ce nombre n'a aucune influence, les références étant prises en compte uniquement lors de la répartition entre classes.

6.3 Comparaison entre modèles

Le Tableau 3 présente les résultats obtenus pour les 3 modèles, avec un taux de rotation de (20%/80%). Les résultats de simulation sont issus de simulations stochastiques. De ce fait, le nombre de répliques et l'horizon ont été ajustés afin de s'assurer d'être sur une valeur asymptotique du temps moyen de déstockage.

| | Nombre de références | | | |
|----|----------------------|--------|--------|--------|
| | 100 | 500 | 1000 | 5000 |
| M1 | 266.67 | 266.67 | 266.67 | 266.67 |
| M2 | 33.53 | 60.19 | 121.43 | 237.60 |
| M3 | 106.93 | 106.93 | 106.93 | 106.93 |

Tableau 3 : Comparaison entre les résultats issus des trois modèles pour un taux de rotation de 20%/80%

A la lecture de ces résultats, il est évident que l'heuristique s'avère très efficace pour un nombre de références très faible. Au fur et à mesure de son augmentation, sa performance diminue jusqu'à être dépassée par le stockage par classes. Ce basculement s'opère entre 500 et 1000 références présentes dans le rack (6250 emplacements de stockage au total).

7 CONCLUSION

L'étude de simulation présentée dans cet article a pour objectif de comparer la performance de trois stratégies de stockage dans un AS/RS à convoyeurs gravitationnels.

Les résultats de l'étude ont montré, outre une amélioration du temps moyen de déstockage d'un produit, une performance relative différente entre le stockage par classes et le stockage par heuristique en fonction du nombre de références différentes présentes dans le rack.

A partir de cette étude, de multiples pistes de recherche restent à explorer. En effet, l'étude a porté sur une disposition particulière des couloirs assujettis à la classe A. Il serait intéressant d'étendre l'étude de (Guenov et Raeside, 1992) réalisée sur un magasin à charge unitaire vers une problématique type AS/RS à convoyeurs gravitationnels.

Dans la même optique, nous réfléchissons actuellement à la possibilité de définir des emplacements de classes dans la profondeur du rack, les produits de la classe A étant tout de suite accessibles (sans restockage), les produits de la classe B étant juste derrière, etc. Cette problématique impose toutefois d'avoir un taux d'utilisation relativement faible des machines de stockage et déstockage pour permettre un restockage en temps masqué des produits.

Enfin, la suite directe de ces travaux sera une application sur un magasin réel, ce qui implique de définir une procédure de réaffectation dynamique des classes en fonction de l'évolution de la demande.

REFERENCES

- Allen, S. L. 1992. A selection guide to AS/R systems. *Industrial Engineering*, 24 (3), p. 28-31.
- Ashayeri, J., R. M. Heuts, M. W. T. Valkenburg, H. C. Veraarts, and M. R. Wilhelm, 2002. A geometrical approach to computing expected cycle times for zone-based storage layouts in AS/RS. *International Journal of Production Research*, 40(17), p. 4467-4483.

- Askin, R. G. and C. R. Standridge, 1993. Modelling and Analysis of Manufacturing Systems, *John Wiley & Sons, Ed.*
- Bozer Y. A. and J. A. White, 1984. Travel time models for automated storage/retrieval systems, *IIE Transactions*, 16(4), p. 329-338.
- Bozer, Y. A. and J. A. White, 1996. A generalised design and performance analysis model for end-of-aisle order-picking system, *IIE Transactions*, 28.
- Caron, F., G. Marchet, and A. Perego, 1998. Routing policies and COI-based storage policies in picker-to-part systems. *International Journal of Production Research*, 36(3), p. 713-732.
- Caron, F., G. Marchet, and A. Perego, 2000. Optimal layout in low-level picker-to-part systems. *International Journal of Production Research*, 38(1), p. 101-117.
- Chang, S. H. and P. J. Egbelu, 1997. Relative positioning of storage/retrieval machines in automated/retrieval systems to minimize maximum system response time. *IIE Transactions*, 29(4), p. 303-312.
- Chew, E.P. and L. C. Tang, 1999. Travel time analysis for general item location assignment in a rectangular warehouse. *European Journal of Operational Research*, 112, p. 582-597.
- De Koster, R., T. Le-Duc, and Y. Yugang, 2008. Optimal storage rack design for a 3-dimensional compact AS/RS. *International Journal of Production Research*, 46(6), p. 1495-1514.
- Egbelu P. J., 1991. Framework for dynamic positioning of storage/retrieval machines in an automated storage/retrieval system, *International Journal of Production Research*, 29(1), p. 17-37.
- Egbelu, P. J. and C. T. Wu, 1993. A comparison of dwell point rules in storage/retrieval systems, *International Journal of Productions Research*, 31(11), p. 2515-2530.
- Eldemir F., R. J. Graves and C. J. Malmborg, 2004. New cycle time and space estimation models for automated storage and retrieval system conceptualization, *International Journal of Production Research*, 42 (22), pp. 4767-4783.
- Eynan, A., M. J. Rosenblatt, 1994. Establishing zones in single-command class-based rectangular AS/RS. *IIE Transactions*, 26(1), p. 38-46.
- Gaouar N., Z. Sari, et N. Ghouali, 2005, Développement d'une Heuristique de Stockage/Déstockage pour un Système AS/R à Convoyeur Gravitationnel. *6e Congrès International de Génie Industriel, (GI'2005)*, 7-10 Juin 2005, Besançon Micropolis, France.
- Gaouar N., Z. Sari, et N. Ghouali, 2006, Modélisation et implémentation d'une Heuristique de Stockage/Déstockage pour un Système AS/R à Convoyeur Gravitationnel. *6ème Conférence Franco-phone de Modélisation et Simulation (MOSIM'06)*, 3-5 avril 2006, Rabat, Maroc.
- Graves, S. C., W. H. Hausman, and L. B. Schwarz, 1977. Storage-retrieval interleaving in automatic warehousing systems. *Management Science*, 23 (9), p. 935-945.
- Guenov M. and Raeside R., 1992. Zone shapes in class based storage and multicommand order picking when storage/retrieval machines are used. *European Journal of Operational Research*, 58, p. 37-47.
- Ha J-W and Hwang H., 1994. Class-based storage assignment policy in carrousel system. *Computers in Industries Engineering*, 26 (3), p. 489-499.
- Hall, R.W., 1993. Distance approximation for routing manual pickers in a warehouse, *IIE Transactions* 25, p. 77-87.
- Hausman, W. H., L. B. Schwarz, and S. C. Graves, 1976. Optimal storage assignment in automatic warehousing systems, *Management Science*, 22 (6), p. 629-638.
- Hwang H. and Lim J. M., 1993. Deriving an optimal dwell point of the storage/retrieval machine in an automated storage/retrieval system, *International Journal of Production Research*, 31(11), p. 2591-2602.
- Jarvis, J.M. and E.D. McDowell, 1991. Optimal product layout in an order picking warehouse. *IIE Transactions*, 23(1), p. 93-102.
- Le-Duc, T. and R. De Koster, 2004. Travel distance estimation in a single-block ABC storage strategy warehouse, In: Fleischmann and Klose (eds.) *Distribution Logistics: advanced solutions to Practical Problems*, p. 185-202 (Berlin: Springer Verlag).
- Le-Duc, T. and R. De Koster, 2005. Travel distance estimation and storage zone optimisation in a 2-block ABC-storage strategy warehouse. *International Journal of Production research*, 43(17), p.3561-3581.
- Le-Duc, T. and R. De Koster, 2007. Travel time estimation and order batching in a 2-block warehouse. *Report, European Journal of Operational Research*, 176(1), p. 374-388.

- Lee, M. -K., 1992. A storage assignment policy in man-on-board automated storage/retrieval system, p. 2281-2292.
- Lee, H. F., and S. K.Schaefer, 1996. Retrieval sequencing for unit-load automated storage and retrieval system with multiple openings, *Int Jnl Production Research*, 34 (10), p. 2943-2962.
- Lee, H. F., 1997. Performance analysis for automated storage and retrieval systems. *IIE Transactions*, 29 (1), p.15-28.
- Material Handling Institute, Inc., 1977 *Considerations for planning and installing an automated storage/retrieval systems, AS/RS Document-100 7M*.
- Muppani V. R. and G. K. Adil, 2008. A branch and bound algorithm for class based storage location assignment. *European Journal of Operational Research*, 189 (2) p. 492-507
- Park, B. C., R. D. Foley, J. A. White, and E. H. Frazelle, 2003. Dual command travel times and miniload system throughput with turnover-based storage. *IIE Transactions*, 35, p. 343–355.
- Park, B. C., R. D. Foley, and E. H. Frazelle, 2006. Performance of miniload systems with two-class storage. *European Journal of Operational Research*, 170, p. 144–155.
- Peters B. A., J. S. Smith and T. S. Hale, 1996. Closed form models for determining the optimal dwell point location in automated storage and retrieval systems, *International Journal of Production Research*, 34(6), p. 1757-1771.
- Petersen, C. G., 1999. The impact of routing and storage policies on warehouse efficiency. *International Journal of Operations & Production Management*, 19(10), p. 1053-1064.
- Petersen, C. G. and G. Aase, 2003. A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking. *International Journal of Production Economics* 92, 11-19.
- Roodbergen, K.J., 2001. *Layout and routing methods for warehouses*. Ph.D. Series, Erasmus Research Institute of Management (ERIM).
- Roodbergen, K.J. and R. De Koster, 2001. Routing order-pickers in a warehouse with a middle aisle. *European Journal of Operational Research*, 133, p.32-43.
- Roodbergen K. J. and I. F. A. Vis, 2009. A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research*, 194, p. 343-362
- Rosenblatt, M.J., and A. Eynan, 1989. Deriving the optimal boundaries for class-based automatic storage/retrieval systems. *Management Science*, 35(12), p. 1519–1524.
- Sari Z., 2003. *Modélisation, Analyse et Evaluation des Performances d'un AS/RS à Convoyeur Gravitationnel*. Thèse de Doctorat d'état, Université de Tlemcen, Algérie.
- Sari Z., C.Saygin, and N.Ghouali, 2005. Travel-Time Models for Flow-Rack Automated Storage and Retrieval Systems, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25, p. 979-987.
- Sari Z., S. Grassman, and N. Ghouali, 2007. Impact of Pickup/Dropoff Stations and Restoring Conveyor Locations on Retrieval Time Models of Flow-Rack Automated Storage and Retrieval Systems, *Production Planning and Control*, 18 (2), p.105-116.
- Tang, L. C. and E. P. Chew, 1997. Order picking systems: batching and storage assignment strategies. *Computer & Industrial Engineering*, 33(3), p. 817-820.
- Van den Berg, J.P., 1996. Class-based storage allocation in a single command warehouse with space requirement constraints. *International Journal of Industrial Engineering*, 3(1), p. 21–28.